

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ШТОФЕЛЬ ОЛЬГА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 620.193:621.791

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНКИ
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ
СТАЛЕЙ**

05.16.01 - металознавство та термічна обробка металів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі № 12 Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Рабкіна Мар'яна Данилівна,
Інститут електрозварювання імені Євгена Оскаровича Патона НАН України, старший науковий співробітник відділу нових конструктивних форм зварних споруд і конструкцій № 012

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Панарін Валентин Євгенович,
Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу надпровідникової електроніки № 12

доктор технічних наук, професор
Єфременко Василь Георгійович,
Приазовський державний технічний університет МОН України, завідувач кафедри фізики

Захист відбудеться «30» березня 2021 року о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м.Київ, проспект Перемоги, 37, корп.. № 9, ауд. 203.

З дисертацією можна ознайомитися у Науковій-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «26» лютого 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої Вченої ради Д 26.002.12



О.В. Степанов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема вибору оптимального способу оцінки технічного стану конструкції щодо прогнозування її залишкового ресурсу, зіставлення результатів дослідження металу, отриманих за допомогою неруйнівних методів контролю конструкцій, таких як візуально-оптичний, ультразвуковий, акустичний і т.і., та традиційних механічних іспитів спільно з фізико-хімічними методами аналізу зразків, таких як оптичний, електронний, рентгенівський, тощо, свідчать про те, що жоден з них не може бути універсальним.

Удосконалення методів діагностики призводить до потреби моделювання складних систем, в яких використовуються інформаційні властивості фрактальних моделей.

Слово фрактал (*fractus*) означає, що складається з фрагментів. Започаткування фрактальної геометрії пов'язано із виходом в 1977 році книги Бенуа Мандельброта «*Fractals: Form, chance, and dimension*». Вже до кінця 20-го століття в багатьох галузях науки в світі, незалежно від предмету дослідження, типу даних і їх обробки, накопичилися численні кореляційні закономірності, які в більшості можна пояснити на основі фрактальних моделей процесів і явищ, оскільки переважна більшість об'єктів в природі не можуть бути описані із застосуванням гладких кривих і гладких поверхонь, властивих звичним геометричним фігурам.

Таким чином, не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи мультифрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є частиною наукових досліджень, які проводились в ІЕЗ ім. Є.О Патона продовж 2014-2018 р.р. в межах відомчого замовлення 1.6.2.12.2 «Розробка методів оцінки конструкційної міцності зварних трубопроводів та посудин тиску атомної енергетики та нафтохімії»

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є виявлення і обґрунтування кореляційних зв'язків фрактальних розмірностей D структури металу і його фізико-механічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- проаналізувати літературні джерела для виявлення підходів до оцінки впливу структурно-текстурної складової матеріалу на тривалість його безпечної експлуатації і обґрунтування вибору фрактального методу;
- розробити алгоритм та створити програмний супровід для оцінки текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках;
- порівняти результати дослідження за запропонованою методикою з експериментальними даними;

– дослідити вплив умов експлуатації і анізотропії матеріалу на закономірності руйнування із застосуванням розробленої методики.

Об'єкт дослідження – закономірності процесу руйнування фрагментів обладнання після різних термінів експлуатації конструкцій, в т.ч. балонів середнього об'єму (робочий тиск 14,7 МПа) з великим терміном експлуатації, ректифікаційних колон та арматурних канатів.

Предмет дослідження – пошук взаємозв'язку фізико-механічних характеристик з структурно-текстурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю D , конструкційних сталей феритно-перлітного класу, а саме Дс, 35Г/40, 20К та для порівняння сталі 70, 80, 85.

Методи дослідження: неруйнівний контроль, короткотривалі випробування циліндричних і плоских зразків на одновісне розтягування, випробування на ударний вигин, хімічний аналіз, металографічні дослідження мікроструктури, фрактографічні дослідження поверхні експлуатаційних зламів і зламів після випробувань на розтягування і ударну в'язкість, дослідження кристалографічної текстури з побудовою обернених полюсних фігур.

Наукова новизна одержаних результатів: робота є комплексним дослідженням структури та властивостей металу конструкційних сталей, що передбачає застосування методу мультифрактального аналізу для виявлення зв'язків фрактальної розмірності та фізико-механічних властивостей матеріалу у металах ферито-перлітного класу.

У дисертаційній роботі:

1. Вперше встановлено кореляційні залежності, які пов'язують фізико-механічні характеристики ферито-перлітних сталей із фрактальними розмірностями. Використання методу фрактального аналізу дає можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів безпосередньо в реальних конструкціях без проведення спеціальних випробувань з високою вартістю.

Показано, що існує залежність фрактальної розмірності із товщиною стінки. Показано, що структурні і магнітні властивості впливають на фрактальну розмірність. Встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю KCV при -10°C і 20°C , руйнівним тиском, а також границями пластичності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .

2. Вперше встановлено, що з використанням методу фрактального аналізу існує можливість запобігти поширенню тріщин в елементах діючих конструкцій внаслідок тривалого впливу корозійних середовищ та значних експлуатаційних навантажень.

Досліджено ознаки характеристики анізотропії прокату для сталі 20К в трьох напрямках: повздовжньому, поперечному та під кутом 45 градусів. Використаний підхід фрактального аналізу до профілю тимчасової кривої, що відповідає загальній роботі руйнування, в тому числі тієї частини кривої, яка відповідає енергії зародження тріщини.

3. Вперше показано, що вище значення фрактальної розмірності для сталей 70, 80, 85 відповідає більш крихкому руйнуванню, а менше значення в'язкому.

Встановлено, *що* в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженнями, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: для сталі 70 (фрактальна розмірність структури лежить у межах 1.97-2.00, для сталі 80 – у межах 1.74-1.83, та сталі 85 – 1.9-1.95.

4. Вперше встановлено, що фрактальна розмірність змінюється залежно від наявності неметалевих включень для сталей ферито перлітного класу.

Доведено, що для коректного аналізу необхідне введення поняття мультифракталу, яке поєднує в собі фрактальну розмірність структури, фрактальну розмірність включень.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в роботі результати і встановлені зв'язки мають практичний інтерес для експрес прогнозування причин руйнування для сталей ферито-перлітного класу, зокрема сталей Дс, 35Г/40, 20К, 70, 80, 85. Отримані результати щодо фрактальної розмірності структури в поєднанні з іншими даними неруйнівного контролю, зокрема визначення коерцитивної сили, товщини стінки в посудинах тиску, тощо, дозволяють оперативно виявити найбільш небезпечну ділянку в елементах металевих конструкцій, що дає можливість попередити передчасне руйнування діючих об'єктів. Даний метод наразі активно застосовується для зварних з'єднань у відділі дослідження фізико-хімічних процесів в зварювальній дузі Інституту електрозварювання імені Євгена Оскаровича Патона НАН України.

Особистий внесок здобувача. Авторкою самостійно проаналізовано науково-технічну літературу, одержано основні результати наукових експериментальних досліджень та виконано узагальнення результатів, що є суттю дисертаційної роботи. За час підготовки дисертаційної роботи здобувачка створила програмний супровід для підрахунку фрактальної розмірності фотографій зламів, тріщин тощо методом фрактального аналізу. За допомогою створеної програми нею проведено більшість досліджень поверхонь руйнування сталевих зразків. Для досліджених зразків встановлено залежності між фрактальною величиною і їх механічними властивостями матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи представлені та опубліковані у матеріалах конференцій: VIII Міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів - Зварювання та споріднені технології., XVI Міжнародній заочній науково-практичній конференції: «Розвиток науки в XXI столітті, Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», XV Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції - Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації, XVII Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції – Історія розвитку науки, техніки та освіти, XIV Міжнародній науковій конференції для молодих вчених, XXIV Всеукраїнській науковій конференції молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за

темою: «Наука, як феномен національної культури», XXI Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень, International scientific conference INNOVATION AROUND US '2020.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи представлений у 13 публікаціях, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статей у виданнях іноземних держав, 2 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 8 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 163 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 115 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 25 таблицями та 63 рисунками. Список використаних джерел містить 125 найменувань, з них 80 кирилицею та 45 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність застосування методу фрактального аналізу для визначення фізико-механічних властивостей конструкційних сталей, а саме фрагментів обичайки ректифікаційної колони Ø2200×12 мм із сталі 20К, фрагментів кисневих балонів ємністю 40 л із сталі Дс, 35Г і фрагментів арматурних канатів із Ст.70, 80 та 85; наведено загальну характеристику дисертації; зв'язок з науковими темами; сформульовано мету та завдання досліджень; вказано об'єкти та предмети досліджень; висвітлено наукову новизну та практичну цінність результатів роботи. Наведено інформаційні дані щодо апробації роботи і кількості опублікованих праць, у яких відображено основний зміст роботи.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи, присвячених вивченню металографічної структури матеріалів та застосуванню методу фрактального аналізу. Наведено приклад застосування фрактального аналізу до меж зерен згідно до класифікації (ГОСТ-5639-82). Проаналізовано вибір ферітно-перлітних матеріалів згідно кількісної характеристики основних елементів мікроструктури (ГОСТ 8233-56). Сформульовано сутність фрактального підходу, яка полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні. Постулюється, що фрактальна геометрія описує структуру більш ретельно, ніж стандартна металографія, але за умовою, що дана структура є фрактальною. Встановлюється взаємозв'язок між фрактальною розмірністю і механічними властивостями матеріалу з метою прогнозування експлуатаційних характеристик за допомогою фрактальних множин.

У другому розділі наведено методи експериментальних досліджень, обґрунтовано вибір типів сталі, зокрема: фрагменти обичайки ректифікаційної колони Ø2200×12 мм із сталі 20К для оцінки впливу анізотропії прокатаного металу на опір руйнуванню; фрагменти кисневих балонів ємністю 40 л із сталей Дс та 35Г після

різного терміну експлуатації;фрагменти арматурних канатів із сталей 70, 80 та 85 після передчасного руйнування.

Описані види руйнівного та неруйнівного контролів, застосовані в експерименті, зокрема: магнітний метод для визначення коерцитивної сили за допомогою приладу КРМ-Ц-К2М і ультразвуковий - визначення товщини стінки за допомогою товщиномірів ТУЗ-2 і УТ-04 ЕМА, механічні іспити зразків металу для визначення статичної міцностіна випробувальній установці Instron 8802 згідно ГОСТ 1497-84, ударні випробування Шарпі зразків проведено згідно зі стандартом ISO 14556-2000 у діапазоні температур $-120...+80^{\circ}\text{C}$ на вертикальному інструментальному копрі, спроектованому і виготовленому в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України,металографічні дослідження структури - на мікроскопі NEOPHOT-32 в діапазоні збільшень $\times 200 \dots \times 1000$ зі застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS, фрактографічні та кристалографічні дослідження структури.

Наведений алгоритм для оцінки структурно-текстурного стану матеріалу, заснованого на його фрактальних характеристиках. Розроблений програмний супровід для застосування фрактального методу щодо оцінки структурних параметрів матеріалу на мові програмування C#.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень впливу структурних і магнітних чинників нафрактальні характеристики поверхонь руйнування. Проведено дослідження структурної неоднорідності в металі оболонок посудин тиску (балони Б1-Б29). Проаналізований взаємозв'язок коерцитивної сили і текстурних параметрів металу. Механічні властивості металу у зв'язку з фрактальними особливостями структури листових і трубчастих елементів.

Вимірювання проведені при підготовці балонів до гідравлічних випробувань, *вперше* дозволили дізнатися, що являє собою внутрішня поверхня балонів і визначити потенційно небезпечні ділянки циліндричної стінки. Ці відомості представляють

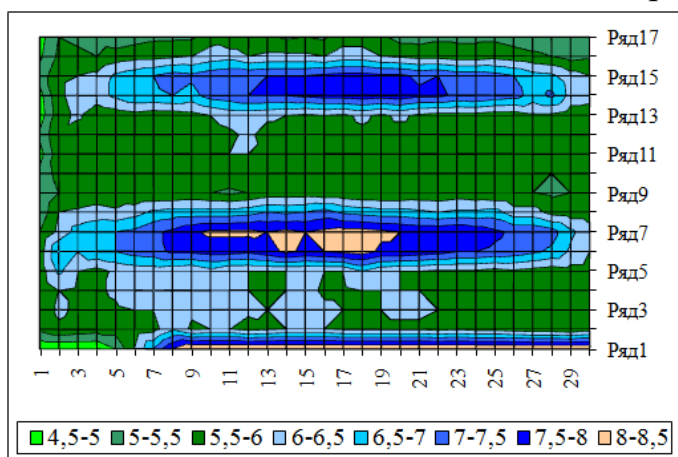


Рис. 1 Розподіл товщини стінки $t(x)$

надзвичайний інтерес не тільки в окремому випадку, але й під час експлуатації балонів – при вирішенні питання продовження або припинення терміну служби.

Проведені гідравлічні випробування показали, що міцність балонів визначається не тривалістю експлуатації, а їх технічним станом. Фізико-механічні дослідження зразків зруйнованих балонів з великим терміном служби не підтвердили загально прийнятого уявлення щодо деградацію властивостей металу.

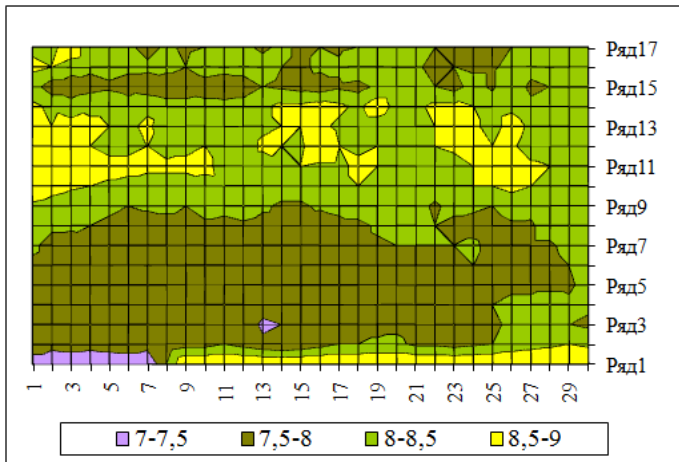


Рис. 2 Розподіл коерцитивної сили H_c , А/см після руйнування при навантаженні 51,9 МПа

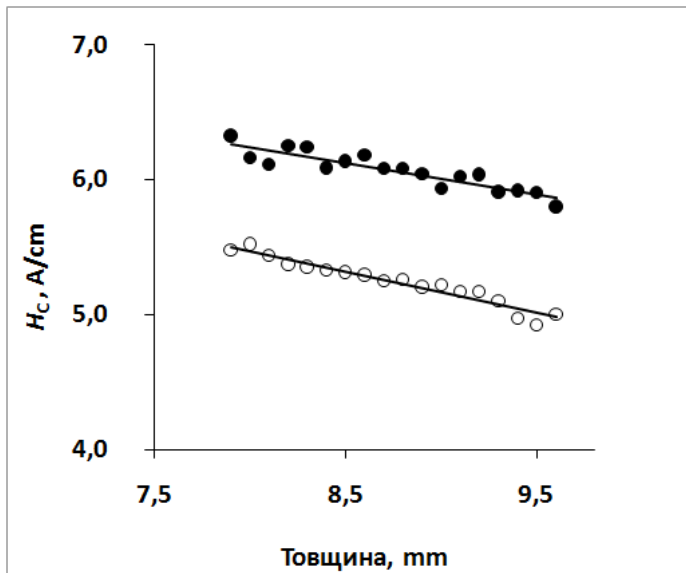


Рис. 3 Вплив товщини стінки і напрямку вимірювання на показники H_c - поздовжній напрямок – темні точки, кільцевий напрямок – світлі точки.

одних і тих же точках вздовж циліндра і в кільцевому напрямку, розташовуються еквідистантно.

В результаті визначення металографічних і кристалографічних особливостей металу, підтверджена залежність коерцитивної сили від структурно-текстурних параметрів сталі (рис.3).

Показано (рис. 4), що товщина стінки посудини практично не впливає на показники фрактальної розмірності. В той же час відмічається, що зміна коерцитивної сили і фактичного запасу міцності має схожий характер відносно фрактальної розмірності.

Оцінка товщини стінки балонів за допомогою ультразвукового товщиноміра УТ-04 ЕМА (Дельта) і напружено-деформованого стану за допомогою коерцитиметра КРМ-Ц К2М дала можливість отримати корисну інформацію (рис. 1., рис. 2.) щодо технічного стану балонів. Отже, товщинометрію та коерцитиметрію доцільно рекомендувати для технічного діагностування

балонів, адже допустима товщина стінки за ДСТУ, повинна бути не менше 6,8 мм.

За даними для балонів зі сталі Дс, які відпрацювали 25...30 років, сформульовані наступні критерії оцінки стану:

- при коерцитивній силі, що дорівнює $H_c < 8$ А/см балони можуть працювати без обмежень;
- при $H_c = 8 \div 9,5$ А/см термін експлуатації повинен бути обмежений через накопичення пошкоджень;
- при $H_c > 9,5$ А/см через ризик руйнування балони повинні бути виведені з експлуатації.

Встановлено кореляцію між $H_c(y)$ і $t(x)$, яка, в основному, характеризується лінійною залежністю (рис. 4.) типу: $y = A \cdot x + B$, а значення коерцитивної сили, виміряні в

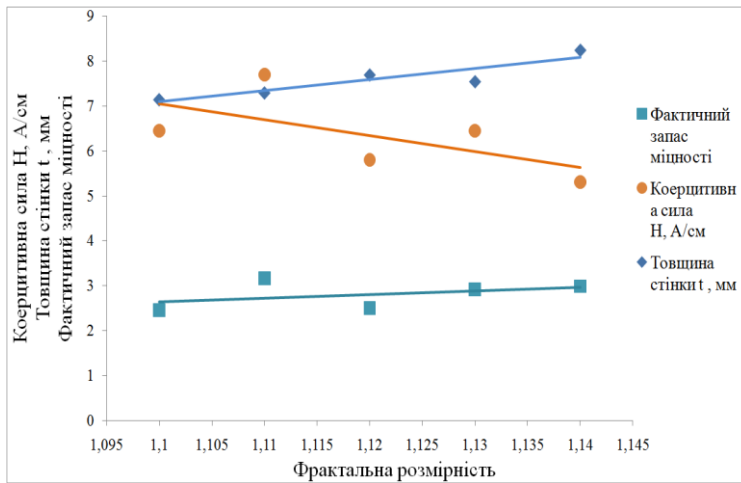


Рис. 4 Фрактальна розмірність, товщина стінки, коерцитивна сила і запас міцності

контрольованого вальцювання вивчали раніше. Але відсутні результати про вплив звивистості меж зерен на механічні властивості металу. Кількісно визначити цей параметр можна за їхньою фрактальною розмірністю – мірою складності об'єкта. Тому конфігурацію меж зерен оцінюють за фрактальною розмірністю їх профілю у двовимірному просторі ($1 \leq D \leq 2$), яку коротко називають фрактальною розмірністю межі зерна.

Визначено кристалографічну текстуру і фрактальну розмірність меж зерен сталі кисневих балонів після різних термінів експлуатації та встановлено кореляційні зв'язки з механічними характеристиками. Досліджували зовнішній, центральний і внутрішній перетини відібраних фрагментів, а також перетин, перпендикулярний осьовому напрямку балона. У всіх випадках перед зніманням кривих полюсної густини відповідні поверхні хімічно полірували на глибину 0,1 мм, щоб видалити спотворений механічною обробкою шар.

Зразки з трубного фрагменту вирізано у трьох напрямках: повздовжньому - циліндр радіусом 25 мм, поперечному - кубик $17 \times 17 \times 17$ мм та під кутом 45.

Фрактальну розмірність меж зерен металу усереднювали за товщиною стінки балонів (табл. 1).

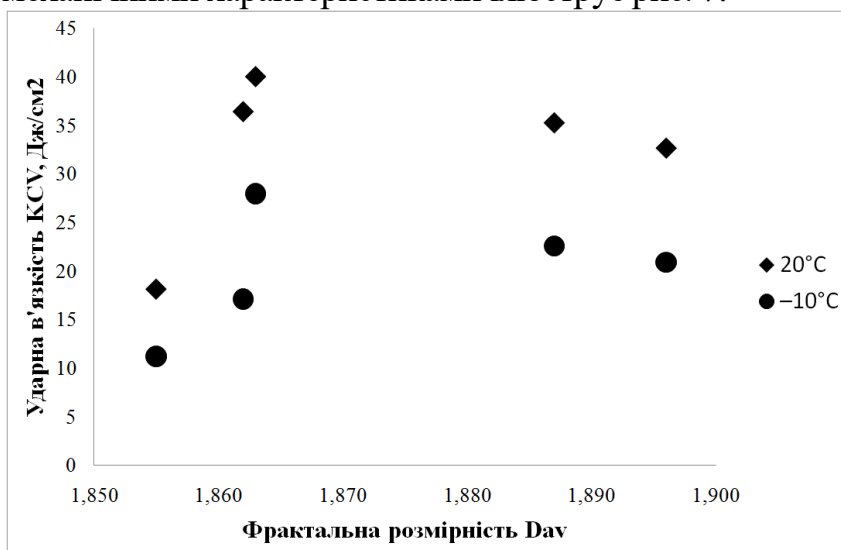
Таблиця 1 - Фрактальна розмірність меж зерен та механічні властивості металу

Балон	Середня фрактальна розмірність D_{av}	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²		Руйнівний тиск, P , МПа	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності σ_B , МПа
		20°C	-10°C			
Б18	1,11	32,65	20,85	49,9	476	770
Б21	1,14	35,25	22,55	51,4	498	671
Б23	1,10	18,15	11,14	55,1	446	725
Б16	1,13	40,0	27,95	48,3	537	712
Б20	1,11	36,4	17,05	47,3	524	708

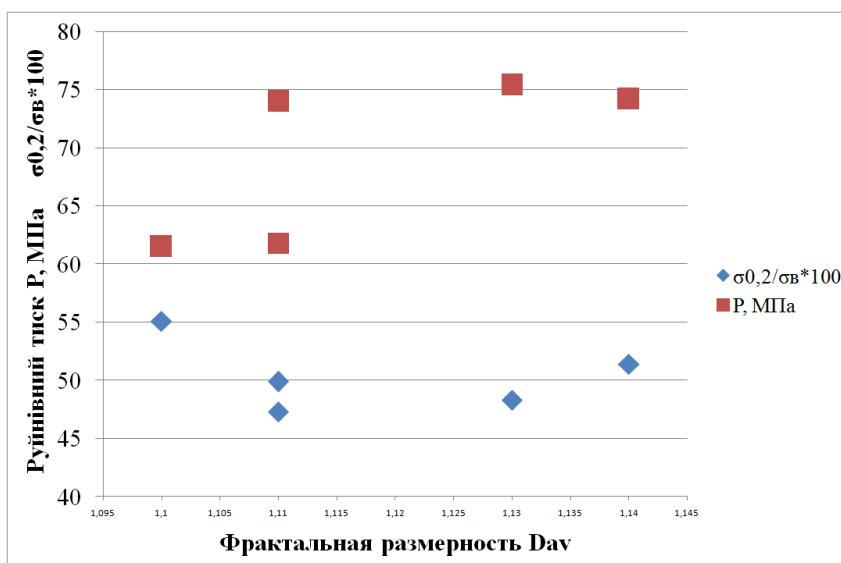
В результаті проведених розрахунків методом кінцевих елементів встановлено критичні значення тиску перед руйнуванням в досліджуваних балонах з похибкою в 9-10%, що виникає через неповну картину з вимірювання товщини стінки, використання даних механічних випробувань для одновісного напруженого стану, а також – неоднорідності структури металу конструкції.

Фрактальну природу дислокаційної структури в сталі після

Результати аналізу кореляційних зв'язків фрактальної розмірності меж зерен з механічними характеристиками ілюструє рис. 7.



а



б

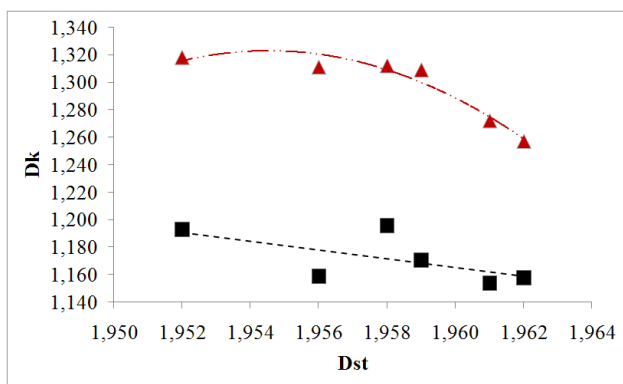
Рис.5. Кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності D_{av} меж зерен з: а – ударною в'язкістю KCV при -10°C і 20°C , руйнівним тиском, а також б – границями текучості $\sigma_{0.2}$ і міцності σ_B .

стини межі, або поширюється крізь зерно, і для подальшого її руху вздовж межі потрібно більше енергії, ніж для руху крізь зерно.

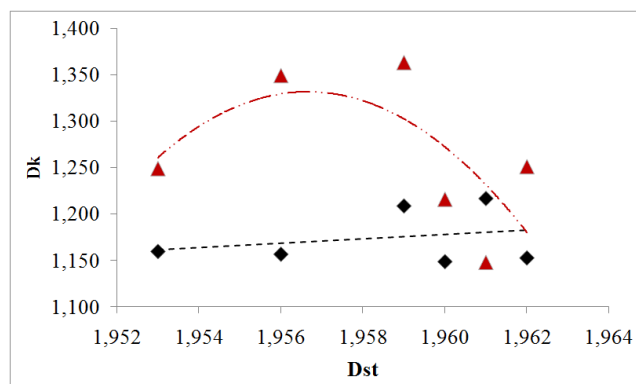
За результатами випробувань на короткочасне розтягування встановлено взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих, які включають як стадію зародження, так і стадію розповсюдження руйнування та відповідними розмірностями поверхонь

Встановлено (рис. 5а), що з ростом фрактальної розмірності меж зерен від 1,10 ударна в'язкість спочатку збільшується, а руйнівний тиск зменшується, але далі вони досягають насичення. Найменша фрактальна розмірність 1,10 відповідає металу балона Б23, який крихко руйнувався навіть при кімнатній температурі

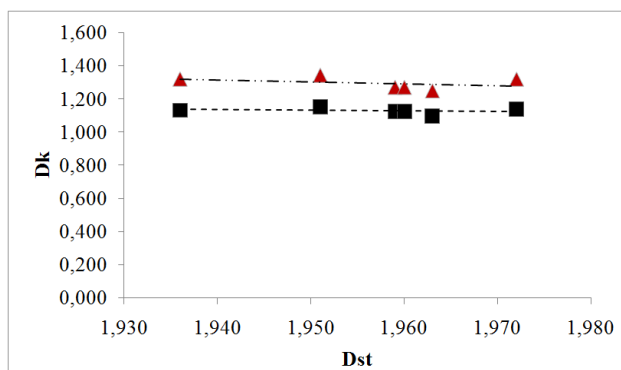
за найменшої ударної в'язкості і найбільшого руйнівного тиску. Випробування всіх балонів на ударну в'язкість при -10°C також підтвердили крихкий характер руйнування. При цьому зі збільшенням фрактальної розмірності меж зерен, а отже, їх звивистості, поширення тріщини вздовж початкового напрямку ускладнюється: щини слабшає. Це може означати, що механізм руйнування змішаний, інтеркристалітний – транскристалітний, що призводить до росту ударної в'язкості. Іншими словами, тріщина або росте вздовж звивистої частини



а



б



в

Рис. 6. Взаємозв'язок фрактальних розмірностей ділянок кривих руйнування на стадії зародження тріщини і відповідних поверхонь зламів в зразках (двокрапка пунктирна лінія) та взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих загального руйнування і відповідних поверхонь зламів в зразках (пунктирна лінія): повздовжній напрямок – а; поперечний напрямок – б; під кутом 45° – в.

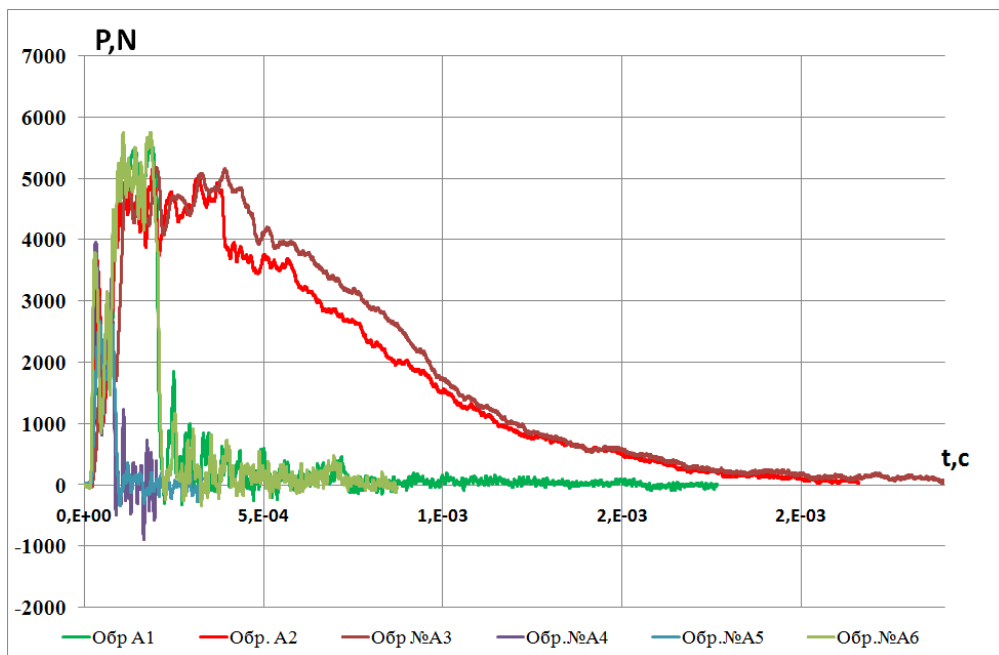


Рис. 7 Криві випробування зразків на ударний вигин у поздовжньому напрямку

руйнування зразків. Вони мають різний характер (рис. 6 – двокрапка пунктирна лінія). Так, лінійну залежність мають лише зразки, вирізані під 45° (рис. 6, в). Для повздовжнього напрямку (рис. 6, а), а також для зразків, вирізаних поперечно (рис. 6, б) залежність має поліноміальний

вид другого порядку. Тим не менше той факт, що в різних напрямках існують різні типи залежностей, може свідчити про ознаки анізотропії. Отже, вплив анізотропії прокату відбивається лише на стадії розвитку руйнування, що має бути враховано при виборі матеріалу відповідного призначення.

Таким чином, співставлення фрактальних розмірностей кривих руйнування (рис.7) з відповідними фрактальними розмірностями поверхонь зламів (табл..2) показали, що вплив анізотропії прокату має місце лише на стадії розповсюдження тріщини, енергія зародження тріщини практично не залежить від напрямку прокату.

Таблиця 2 - Взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих руйнування і відповідних поверхонь зламів в діапазоні температур $-50^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$

Температура Т, $^{\circ}\text{C}$		-50,0	-50,0	19,5	22,0	50,0	50,0
Повздовжній напрямок руйнування							
n		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Фрактальна розмірність	$D_{k\max}$	1,216	1,251	1,148	1,363	1,249	1,349
	D_{st}	1,960	1,962	1,961	1,959	1,953	1,956
	D_k	1,149	1,153	1,217	1,209	1,160	1,157
Поперечний напрямок руйнування							
n		S7	S8	S9	S10	S11	S12
Фрактальна розмірність	$D_{k\max}$	1,311	1,257	1,312	1,318	1,309	1,272
	D_{st}	1,956	1,962	1,958	1,952	1,959	1,961
	D_k	1,159	1,158	1,196	1,193	1,171	1,154
Напрямок руйнування під кутом 45°							
n		S13	S14	S15	S16	S17	S18
Фрактальна розмірність	$D_{k\max}$	1,247	1,318	1,319	1,342	1,269	1,268
	D_{st}	1,963	1,972	1,936	1,951	1,959	1,960
	D_k	1,097	1,138	1,133	1,154	1,125	1,124

Співставлення даних показало, що взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих руйнування і відповідних поверхонь руйнування мають різний характер, отже той факт, що в різних напрямках існують різні залежності, свідчить про наявність анізотропії.

У четвертому розділі наведено результати застосування підходів мультифрактальної параметризації для оцінки експлуатаційних пошкоджень. Передумовою для проведення досліджень, спрямованих на встановлення можливої взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури та включень, є припущення щодо їх взаємної однозначної відповідності. Розробка методу визначення механічних властивостей металу шляхом аналізу фрактальної розмірності складових його структури доповнює існуючі методи оцінки якісних характеристик в матеріалознавстві, що дозволяє встановлювати зв'язок між структурою і механічними властивостями металу. Такий підхід дає можливість заощадити витрати, які потрібні для проведення механічних випробувань.

Таблиця 3 - Середні значення характеристик* металу досліджених дротів

Канат	Ділянка	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	$D_{ст}$	$D_{вк}$	ω	δ , %	ψ , %
AK1	Верх	1771,3	1639,0	1,746	0,897	0,53	4,0	29,3
	Низ	1812,4	1670,9	1,828	1,036	0,2	1,4	2,3
	Середина	1818,6	1634,8	1,79	1,127	0,57	5,0	37,6
AK2	Верх	1664,4	1469,0	1,957	0,998	0,13	1,1	10,8
	Низ	1741,6	1530,4	1,932	0,951	0,38	2,3	15,7
	Середина	1806,0	1586,2	1,901	0,92	0,58	5,2	37,2
AK3	Верх	1785,0	1544,4	1,913	0,927	0,54	4,2	34,2
	Низ	1695,1	1370,2	1,948	0,936	0,49	3,2	13,1
	Середина	1754,3	1456,9	1,923	0,909	0,63	6,3	46,8
AK4	Верх	1785,0	1544,4	1,912	0,935	0,54	4,2	34,2
	Низ	1695,1	1370,2	1,953	0,931	0,49	3,2	13,1
	Середина	1754,3	1456,9	1,929	0,909	0,63	6,3	46,8
AK5	Верх	1720,8	1684,2	-	1,005	0,07	1,0	8,0
	Низ	1704,0	1483,5	1,973	0,961	0,36	2,1	12,7
	Середина	1767,7	1583,1	-	0,922	0,58	5,0	37,7
AK6	Верх	1758,8	1540,0	1,921	0,927	0,54	4,2	21,5
	Низ	1699,6	1543,7	1,951	0,932	0,51	3,5	25,2
	Середина	1762,1	1543,7	1,926	0,925	0,56	4,6	46,6
ТУ У 00191046.014-95		1670,0	1500,0	-	-	-	4,0	-

* σ_B , МПа - тимчасовий опір або межа міцності, σ_{02} , МПа - межа плинності, $D_{ст}$ – фрактальна розмірність мікроструктури, $D_{вк}$ – фрактальна розмірність включень, ω - пошкодженість металу, δ , % - відносне видовження, ψ , % - відносне звуження.

випробуваннях на мало-циклове втомне (МЦВ) руйнування металу зварних з'єднань трубопроводу показано, що довговічність зменшується при збільшенні фрактальної розмірності зламів.

Фрагменти дротів довжиною 500...550 мм і діаметром близько 5 мм були вирізані з трьох різних ділянок: верхній і нижній (по відношенню до місця розриву) каната, а також неушкодженої ділянки, умовно названої середньою частиною зруйнованого каната. За хімічним складом метал дротів АК в основному відповідає маркам сталей 70, 80, 85 (ГОСТ14959-79), що узгоджується з вимогами ТУ У 00191046.014-95.

У розділі розглядаються актуальні експериментальні дослідження впливу саме структурних характеристик на закономірності руйнування сталевих арматурних канатів АЕС. При цьому перспективним вважається застосування фрактального методу при дослідженні поверхонь руйнування. В роботі On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants (Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel', O.O. *et al.*) була наведена фрактальна природа поверхонь крихкого руйнування сталі при ударних випробуваннях. Тісні кореляційні зв'язки фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю, руйнівним тиском і межею плинності сталі встановлені на прикладі кисневих балонів. При



Рис. 8а. Мікроструктура металу (середня частина) дроту армоканатах АК4 (x500)

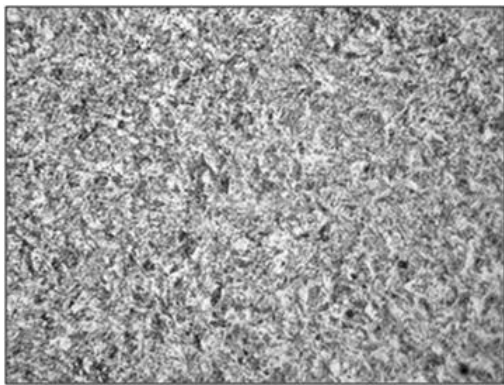


Рис. 8б. Неметалеві включення на полірованій поверхні поперечного перерізу (середня частина) дроту армоканатах АК1 (x500)

Результати спектрального аналізу у досліджених дротах виявлено: АК1 -виявлено підвищений вміст хрому і міді в металі, наявність хрому може позначитися, як на формування фазових складових, так і на підвищення міцностних властивостей, і, відповідно на схильність металу до крихкого руйнування. Крім того, в нижній частині зруйнованого каната виявлено присутність нікелю. АК2 - виявлено не передбачений стандартом нікель, але

він може лише підвищувати пластичність, міцність і антикорозійні властивості сталі, в основному завдяки сприянню подрібненню зерна. АК3 - зафіксовано занижений вміст марганцю, що може впливати на формування структурних і фазових складових та на схильність металу до

крихкого руйнування. АК4- виявлено знижений вміст марганцю та підвищений вміст хрому, наявність зниженого вміст марганцю може позначитися, як на формування фазових складових, так і на підвищення міцності властивостей, і, відповідно на схильність металу до крихкого руйнування. Огляд мікроструктури (рис.8а) металу

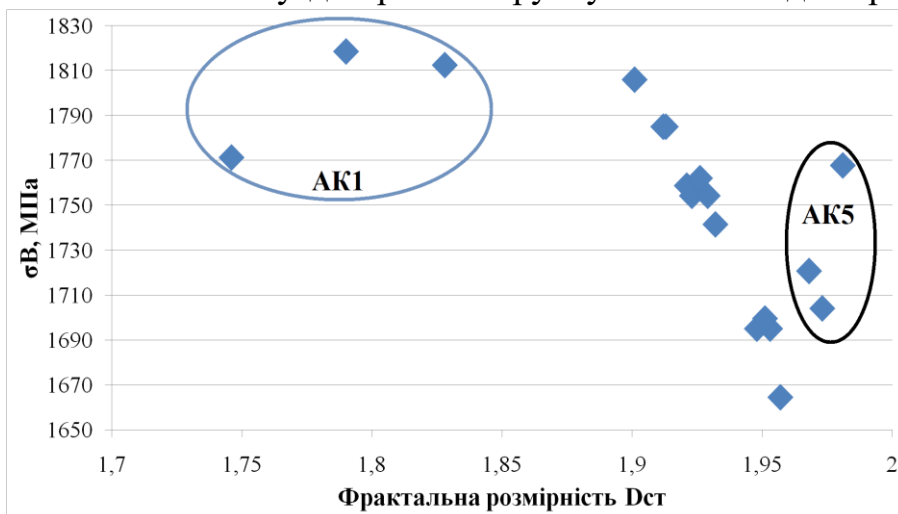


Рис. 9. Залежності різного роду для марок сталі (70, 80,85)

дротів АК, а також неметалевих включень (рис.8б) в більший мірі дають можливість описати та зв'язати механічні властивості із фрактальною розмірністю.

Неметалеві включення і мікроструктури досліджували на мікроскопі NEOPHOT-32 при x500-кратному збільшенні із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

Були отримані середні значення механічних характеристик міцності (границь міцності σ_B і плинності σ_{02}) та пластичності (відносні подовження δ та звуження ψ), фрактальних розмірностей структури металу та включень, та пошкодженості металу ω для досліджених дротів АК наведені в табл. 3

При цьому цікаво відзначити, що канати різних класів можуть мати практично однакові механічні властивості. У той же час канат зі сталі 80 (канат АК1), що займає

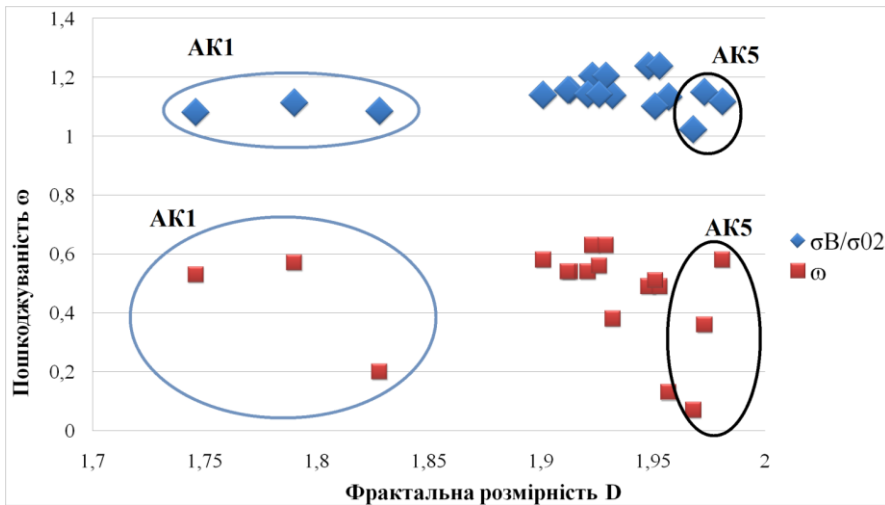


Рис. 10. Межі міцності від фрактальної розмірності структури

проміжне значення за вмістом вуглецю, має найвищий тимчасовим опором і межею плинності в порівнянні з іншими розглянутими варіантами.

Таким чином, для нижньої частини АК1 високі значення межі міцності на розрив супроводжуються різким зниженням характеристик пластичності ($\delta = 1,4\%$ і $\varphi = 2,3\%$), що є істотним відхиленням від вимог

ТУ У 00191046.014-95; для нижньої частини АК2 зміна відносного подовження і відносного звуження перевищує 55%, що є неприпустимим відхиленням від технічних вимог; при розриві дротів АК3 має місце протилежна тенденція - зменшення відносного подовження і відносного звуження спостерігається переважно для нижньої частини відносно місця розриву. Нестабільність пластичності проявляється, коли руйнування відбувається по дефекту, що може бути наслідком пошкоджень, що накопичувались в металі поблизу місця розриву при експлуатації канату. Тимчасовий опір АК4 і межа плинності для нижньої і середньої (далеко від місця розриву каната) частин каната не відповідає вимогам, а в разі нижньої частини - розрив супроводжуються деяким зниженням характеристик пластичності ($\delta = 3,2\%$ і $\varphi = 13,1\%$), що також є відхиленням від вимог ТУ У 00191046.014-95.

Для аналізу результатів була введена величина пошкоджуваності, яка в свою чергу, є процесом різкого вираження і нерівномірного змінення геометричного стану поверхонь, структури і їх властивостей (рис.9). Для підрахунку його введено поняття модуля Юнга через властивості напруження (межі міцності):

$$E = \frac{\sigma_B}{\varepsilon} \quad - \text{поточний модуль} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{100\%} \quad (2)$$

$$\omega = 1 - \sqrt{\frac{E}{E_0}}, \quad (3)$$

де $E_0 = 200 \text{ ГПа}$ (табличне значення для сталі) — модуль пружності неушкодженого матеріалу.

Також, виявлено зв'язок фрактальної розмірності і середніх значень механічних характеристик міцності (границь міцності σ_B і плинності σ_{02}) зображених на рис.10.

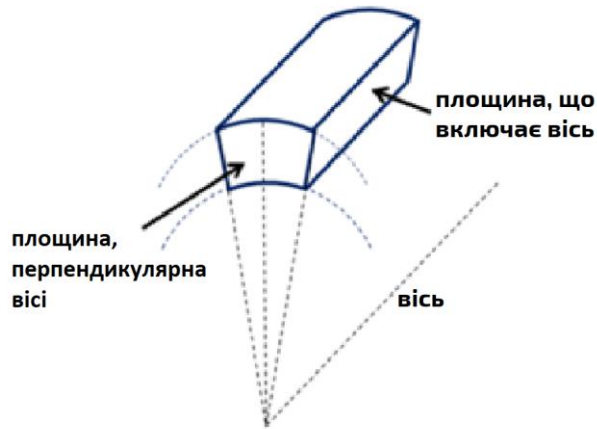


Рис. 11. Дослідження вирізаного зразка з однієї зі сторін.

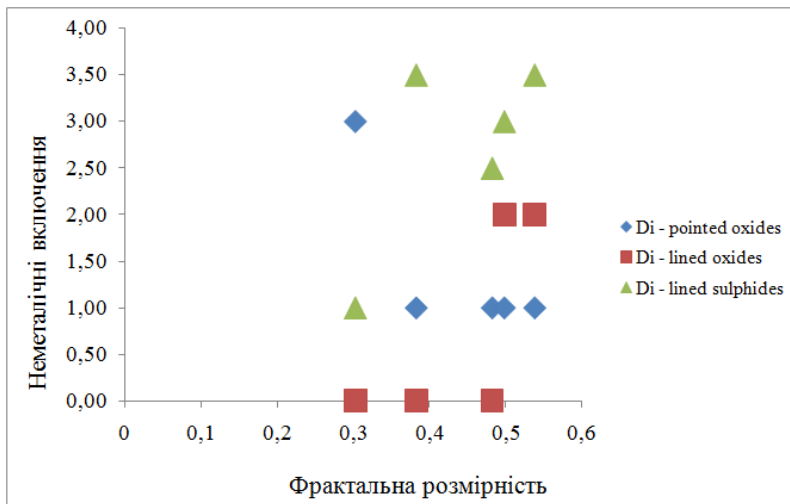


Рис.13. Взаємозв'язок фрактальної розмірності з показниками неметалічних включень для зразків Dі з місця без деформації / з мінімальною деформацією

фектами, утвореними без макроскопічних пластичних деформацій.

У даній роботі проводиться вивчення металографічної картини структури зразків і її фрактальної розмірності. Зразки були вирізані з декількох місць об'єктів з балонної сталі Дс, 35Г / 40Г, 20. Було використано два типи зразків - зразок Dі з місця без деформації / з мінімальною деформацією, зразок Wі з місця з деформацією. Всі зразки виготовляли за стандартною методикою із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Далі вони були досліджені на «забрудненість» - вміст неметалевих включень.

Таким чином, в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженістю, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: більш крихкому руйнуванню відповідає вище значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу. Іншими словами, виявлено тенденцію зменшення фрактальної розмірності, що відповідає більшій пластичності металу і навпаки (табл. 3). Співставлення механічних характери-

стик досліджених канатів зі знайденою згідно із співвідношенням (3) величиною пошкодженості ω , показало, що показник пошкодженості був найменшим для металу з найнижчою пластичністю (табл. 3). Це може бути пов'язано з більш крихким характером руйнування відповідних ділянок канатних дротів. Якщо інтерпретувати пошкодженість як співвідношення площі зламу, що припадає на мікропори і мікротріщини, до номінальної площі перерізу зразка, то пошкодженість за крихким руйнуванням пов'язують з де-

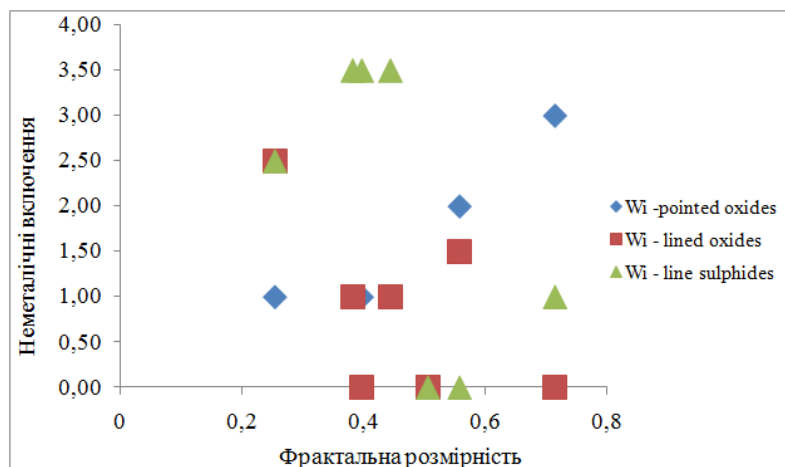


Рис.14. Взаємозв'язок фрактальної розмірності з показниками неметалічних включень для зразків Wi з місця з деформацією.

Неметалеві включення виникають у результаті цілого ряду фізико-хімічних явищ, що протікають у розплавленому металі та металі, який твердіє у процесі його виробництва. Неметалеві включення у сталі є чужорідними тілами, що порушують однорідність її структури, тому їх вплив на механічні та інші властивості може бути значним.

Оцінка забрудненості неметалевими включеннями металу зразків проводилась згідно ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металеві методи визначення

неметалевих включень» шляхом порівняння з еталонними шкалами на полірованої нетравленої поверхні шліфа при збільшенні 100.

Були вирізані 12 зразків, які на першому етапі досліджували по одній з осей – площина перпендикулярна вісі (рис.11) на неметалеві включення.

З паспорта даних об'єкта були взяті результати спектрального аналізу, представлені заводом виробником (таблиця 4), а також дані отримані в лабораторії хімічного аналізу інституту електрозварювання ім Е. О. Патона НАН України (таблиця 5).

Таблиця 4 - Результати спектрального аналізу металу зразків (стандарт)

Массовая доля в процентах									Сталь
С	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	
0,43-0,53	0,17-0,37	0,7-1,0	<0,045	<0,045	<0,35	<0,25	-	-	Д, Дс, ТУ 14-157-15
0,32-0,40	0,17-0,37	0,7-1,00	<0,035	<0,035	<0,30	<0,30	<0,30	-	35Г, ГОСТ 4543-71
0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	<0,040	<0,035	<0,25	<0,30	<0,30		20, ГОСТ 1050-88

З об'єктів із баланої сталі були вирізані зразки на яких проведено спектральний аналіз і порівнений із даними ГОСТу (табл.4, табл.5).

Для одного з зразків (D3) методом фрактального аналізу була підрахована фрактальна розмірність при різних збільшеннях, ці дані дають чітку картину діапазонів, в яких фрактальна розмірність інваріантна, відповідно для порівняльних характеристик варто працювати з зображеннями, зробленими при однакових збільшеннях.

Таблиця 5 - Результати спектрального аналізу металу зразків (експериментальні дані)

Массовая доля в процентах										Сталь/Зразок
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo		
0,512	0,512	0,336	0,54	0,027	0,014	0,140	0,128	0,362		Дс/D ₁ W ₁
0,563	0,563	0,311	0,84	0,032	0,009	0,117	0,150	0,169		Дс/D ₂ W ₂
0,40	0,40	0,32	0,94	0,023	0,030	<0,1	0,05	0,056	<0,05	35Г(40Г)/D ₃ W ₃
0,36	0,36	0,32	0,85	0,025	0,017	0,073	0,027	0,045	0,009	35Г/D ₄ W ₄
0,19	0,19	0,29	0,54	0,02	0,011	0,07	0,05	0,08		20/D ₅ W ₅₁ W ₅₂ W ₅₂

Далі зразок був зашліфований, відполірований, проведена оцінка неметалевих включень і отримані фотографії при збільшенні 200 для дослідження на «забрудненість» та підраховані фрактальні розмірності (табл.6).

Були отримані: спектральний аналіз зразків (табл. 5), залежність фрактальної розмірності від збільшення, підраховані фрактальні розмірності (табл. 6), проведено пошук взаємозв'язку фрактальної розмірності від неметалевих включень (рис.13, рис.14), а також залежність фрактальної розмірності від товщини стінки.

Таблиця 6 - Дані фрактальних розмірностей для кожного зразка

Зразок	D ₁	W ₁	D ₂	W ₂
D	0,482	0,397	0,382	0,464
Зразок	D ₃	W ₃	D ₄	W ₄
D	0,498	0,254	0,538	0,444
Зразок	D ₅	W ₅₁	W ₅₂	W ₅₃
D	0,302	0,558	0,715	0,506

Отже, фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень для різних металів, але вимагає більш ретельного підходу; фрактальна розмірність зменшується при збільшенні товщини стінки; при різних збільшеннях спостерігається невелика зміна фрактальної розмірності, але для більш точних досліджень слід

використовувати одне збільшення для пошуку взаємозв'язків.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

У даній роботі було поставлене та вирішене важливе науково-технічне питання щодо введення додаткового експрес-методу діагностики металу. Вирішення даної проблеми полягало у дослідженні структури металу, фактографічних дослідженнях, а також пошуку кореляцій із механічними властивостями зразків. На даному етапі це є метод руйнівного контролю, але в подальшому планується розвивати його до неруйнівного. Були отримані основні результати: встановлено основні фізико-механічні закономірності для ряду конструкційних сталей, а саме Дс, 35Г/40Г, 20К, 70, 80, 85 та фрактальною розмірністю. Доведено, що межі зерна після трансформації

вихідного зерна в мікроструктурі в інформаційну межу, що «запам'ятала» минулі критичні стани, розкриваються методом фрактальної аналізу:

1. Встановлений вплив структурних і магнітних чинників на фрактальні характеристики поверхонь руйнування. Встановлена слабка залежність фрактальної розмірності від товщини стінки, проте явна залежність із коерцитивною силою;

2. Встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю KCV при -10°C і 20°C , руйнівним тиском, а також межами плинності $\sigma_{0.2}$ і міцності σ_B .

3. Встановлено, що взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих, які включають як стадію зародження, такі стадію розповсюдження руйнування та відповідними розмірностями поверхонь руйнування зразків, має різний характер: лінійну залежність мають лише зразки, вирізані під кутом 45° ; для повздовжнього напрямку, а також для зразків, вирізаних поперечно залежність має поліноміальний вид другого порядку.

4. Встановлено, що різні типи залежностей фрактальних розмірностей кривих загального руйнування і відповідних поверхонь зламів в зразках, які існують в різних напрямках (повздовжньо, поперечно та під кутом 45°), можуть свідчити про ознаки анізотропії і вплив анізотропії прокату відбивається лише на стадії розвитку руйнування, що має бути враховано при виборі матеріалу відповідного призначення.

5. Виконано металографічні дослідження зразків сталей різного хімічного складу. Досліджено мікроструктуру зразку та наявність включень, а також зв'язок фізико-механічних характеристик із фрактальною розмірністю.

6. Встановлено, що в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках атомного реактора, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженістю, і показниками фрактальних розмірностей, а саме: для сталі 70 (фрактальна розмірність структури лежить у межах 1.97-2.00, для сталі 80 – у межах 1.74-1.83, та сталі 85 – 1.9-1.95. Встановлено, що більш крихкому руйнуванню відповідає вище значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу.

7. Встановлено, що фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень для різних металів. Доведено, що для коректного аналізу металічних об'єктів необхідним є введення поняття мультифракталу, яке дає можливість виконання комплексної діагностики методом фрактального аналізу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИЙ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей. *Universum: Технические науки: электрон. Научн. Журн.* 2016. – №10(31) ISSN:2311-5122 (включено до eLIBRARY.RU, EBSCO Discovery, GoogleScholar) – іноземне видання; (Внесок дисертанта: описаний метод Мінковського і його проєкція на оцінку структурних характеристик)
2. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel', O.O. *et al.* On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants. *Mater Sci* 54, 240–249 (2018). (включено до Scopus) – іноземне видання; (Внесок дисертанта: проведений аналіз даних отриманих методом фрактального аналізу)
3. Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. Науково технічний журнал МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, 2019 - Том 91, No. 3, сс. 40-46. (включено до Crossref, DOAJ, Google Scholar, ULRICHSWEB); (Внесок дисертанта: виконаний огляд структури металу методом фрактального аналізу та проаналізовано отримані дані)
4. Olga Shtopfel, Marjana Rabkina ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2), 2019 – с.28-33. (Index Copernicus, Google Scholar, BASE, WorldCat, OpenAIRE, наукометричної бази даних "РІНЦ") ISSN: 2663-3450; (Внесок дисертанта: виконана обробка та аналіз даних отриманих за допомогою методу фрактального аналізу)
5. Shtofel O, Chijskaya T., Kulieznova S., Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г / 40Г and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)* ISSN: 2458-925X Vol. 6 Issue 2, February – 2020 (включено до GoogleScholar, getCITED, ResearchGate etc.) – іноземне видання; (Внесок дисертанта: виконаний підрахунок значення фрактальної величини для включень)

Статті у збірниках матеріалів і тез конференцій:

6. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Фрактальная природа трещин при анизотропии. – Київ VIII МКМУ «Зварювання та споріднені технології», 2015. – 318. (Внесок дисертанта: обґрунтований вибір методу фрактального аналізу для використання на металічних зразках).
7. Штофель О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей. – Харьков: XVI МНПК: «Развитие науки в XXI веке», 2016. – 120-122. (Внесок дисертанта: обґрунтоване застосування методу фрактального аналізу до констукційних сталей)

8. Рабкіна М.Д., Штофель О.О. Фрактальна природа тріщин при руйнуванні зварних з'єднань. – Київ: МК «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», 2018 – с.77-78 (Внесок дисертанта: виконаний огляд методу на прикладі зварного з'єднання)

9. Вовк Я. С., Ляхман А. В., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення структури металу, Розвиток сучасної науки: теорія, практика, інновації: XV Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Дніпро, 29 березня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 5-13. (Внесок дисертанта: виконаний пошук першоджерел для можливості обґрунтування використання методу до металознавства)

10. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу: історія та розвиток. – Київ: XVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція – Історія розвитку науки, техніки та освіти, 2019 – с. 71. (Внесок дисертанта: виконаний пошук першоджерел для можливості обґрунтування використання методу до металознавства)

11. Вовк Я. С., Штофель О. О. Метод фрактального аналізу як сучасний підхід до вивчення фізики, Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях: Збірка матеріалів XIV міжнародної наукової конференції для молодих вчених/ Під ред. проф. Жолткевича Г.М. – Х: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019 – с. 31. (Внесок дисертанта: виконана обробка даних методом фрактального аналізу)

12. Ляхман А.В., Штофель О.О. Історія виникнення методу фрактального аналізу, XXIV Всеукраїнська наукова конференція молодих істориків науки, техніки і освіти та спеціалістів за темою: «Наука, як феномен національної культури»: Мат.конф., 19 квітня 2019 р., м.Київ. – К., 2019. - с.134-136 (Внесок дисертанта: виконаний пошук першоджерел для можливості обґрунтування використання методу до металознавства)

13. Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54 (Внесок дисертанта: виконаний вибір зразка, його обробка та опрацювання фотографії методом фрактального аналізу)

АНОТАЦІЯ

Штофель О.О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 - металознавство та термічна обробка металів. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена опису можливого додаткового методу для діагностики матеріалів, базуючись на понятті фрактальної розмірності та мультифракталів.

Така дисципліна як діагностика металевих конструкцій має безліч різних підходів до визначення їх технічного стану, надійність яких в значній мірі залежить від структури і механічних властивостей застосованих матеріалів, які в свою чергу залежать, перш за все від способу отримання та умов експлуатації. Як відомо, більшість з методів і засобів технічної діагностики, має досить трудомісткий характер. Тому пошук кореляційних залежностей між параметрами фрактальної структури та показниками механічних властивостей, який не потребує значних витрат, є досить актуальною задачею.

Підготовка дисертаційного матеріалу здійснювалася в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України під час навчання в аспірантурі 2014-2018 н.р.

Проведено аналіз даних отриманих методом фрактального аналізу для структури металу, впливу включень та залежності від механічних властивостей для сталей Дс, 35Г/40, 20К, 70,80 та 85.

Результати дозволяють стверджувати, що метод фрактального аналізу можна додатково застосовувати для діагностування та надалі розширювати уявлення про даний підхід для сталей інших марок.

Ключові слова: фрактал, мультифрактал, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, мікроструктура, структуроутворення, фрактографія поверхні руйнування, методи дослідження, діагностика матеріалу.

АННОТАЦИЯ

Штофель А.А. Усовершенствование метода фрактального анализа для оценки взаимосвязи структуры и свойств конструкционных сталей. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - металловедение и термическая обработка металлов. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена описанию возможного дополнительного метода для диагностики материалов, основываясь на понятии фрактальной размерности и мультифракталов.

Такая дисциплина как диагностика металлических конструкций имеет множество различных подходов к определению их технического состояния, надежность которых в значительной степени зависит от структуры и механических свойств применяемых материалов, которые в свою очередь зависят, прежде всего от способа получения и условий эксплуатации. Как известно, большинство из методов и средств технической диагностики, имеет достаточно трудо-

емкий характер. Поэтому поиск корреляционных зависимостей между параметрами фрактальной структуры и показателями механических свойств, не требует значительных затрат, является весьма актуальной задачей.

Подготовка диссертационного материала осуществлялась в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины во время учебы в аспирантуре 2014-2018.

Проведен анализ данных полученных методом фрактального анализа для структуры металла, влияния включений и зависимости от механических свойств для сталей Дс, 35Г / 40, 20К, 70,80 и 85.

Результаты позволяют утверждать, что метод фрактального анализа можно дополнительно применять для диагностики и в дальнейшем расширять представления о данном подходе для сталей других марок.

Ключевые слова: фрактал, мультифрактал, фрактальный анализ, фрактальная размерность, микроструктура, структурообразования, фрактография поверхности разрушения, методы исследования, диагностика материала.

SUMMARY

Shtofel O.O. Improvement of the fractal analysis method to evaluate the relationship between the structure and properties of structural steels. – On the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.16.01 - "Metal science and thermal processing of metals". - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the description of a possible additional method for the diagnosis of materials, based on the concept of fractal dimension and multifractals.

Such a discipline as the diagnosis of metal structures has many different approaches to determining their technical condition. To a large extent, reliability depends on the structure and mechanical properties of the materials used. The mechanical properties, in turn, depend, first of all, on the method of obtaining and operating conditions. As you know, most of the methods and means of technical diagnostics are quite labor-intensive. Therefore, a very actual task is to search for correlation dependencies between the parameters of the fractal structure and indicators of mechanical properties, which does not require significant expenses.

Preparation of the dissertation material was carried out at the Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine during studying in postgraduate studies 2014-2018.

The analysis of the data obtained by the method of fractal analysis for the structure of the metal, the influence of inclusions and the dependence on the mechanical properties for steels Ds, 35G / 40, 20K, 70,80 and 85. The results suggest that the method of fractal analysis can be further used to diagnose and further expand the understanding of this approach for steels of other brands.

Fractal analysis in materials science is a mathematical algorithm for detecting a single numerical element to describe multilevel structures, which, in particular, are the structure of metals, fracture surfaces, fracture zones, structural boundaries of the viscous-brittle transition, and so on.

Due to the long service life of a number of existing structures in these industries, the problem of choosing the optimal method of assessing the technical condition for forecasting their residual life remains urgent. To solve this problem, such a discipline as technical diagnostics is designed, which has a variety of approaches, the reliability of which largely depends on the structure and mechanical properties of the materials used, which in turn depend primarily on the method of production and operating conditions. As you know, most of the methods and tools of technical diagnostics are quite time consuming. Therefore, the search for modern control methods that do not require significant costs is a very important task. In view of this, the paper presents data on existing approaches to assess the impact of structural condition of the material, including rolled anisotropy, the duration of its safe operation and - justification for choosing the fractal method as a modern, affordable, correct and inexpensive way to determine the necessary parameters. The essence of this approach is formulated, which consists in processing by scaling of fractal structure and descriptions of distribution of any structural characteristic at the given scaling. It is postulated that fractal geometry describes the structure more carefully than standard metallography, but on the condition that this structure is fractal.

Thus, the aim of the study is to identify and substantiate correlations between fractal parameters of structure D and physical and mechanical characteristics of a number of low-alloy structural steels, including yield strength, destructive pressure, toughness, coercive force, etc. The choice of the type of steel with ferrite-pearlitic structure, to which the investigated materials belong, is substantiated, namely: steel D_s for oxygen cylinders, steel 20K for pressure vessels, and high-strength steel for reinforcing ropes. Full-scale samples, as well as samples destroyed after mechanical tests, calculate the fractal dimension and search for the relationship between mechanical characteristics and fractal dimensions in order to predict performance using fractal sets.

Therefore, without conducting high-value special tests, but only using a fractal approach, there is a real opportunity to determine and predict the performance of materials, in particular in existing structures. In this regard, an algorithm was developed and software was created to assess the structural and textural state of the material based on its fractal characteristics and compared the results of the study of fragments of metal structures by the proposed method during experimental tests with the results of previously known methods of metal diagnostics.

Key words: fractal, multifractal, fractal analysis, fractal dimension, microstructure, structure formation, fractography of surface of destruction, research methods, material diagnostics.